

การสร้างแบบจำลองสนามแม่เหล็กของแขนรับไฟแบบแขนเดียวในระบบส่งกำลังไฟฟ้าเหนือศีรษะ 25 kV สำหรับรถไฟไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Magnetic Field Modeling of a Single-Arm Pantograph a 25 kV Overhead Power Transmission System for Electric Railway Using a 3D Finite Element Method

อารักษ์ บุญมาตย์* และ พงษ์พิสิฐ สายคำ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

*Corresponding Author: arak.bu@rmuti.ac.th, 080-1647600

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของแขนรับไฟแบบแขนเดียวในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ 25 กิโลโวลต์ สำหรับรถไฟ ซึ่งแสดงในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อให้ผลลัพธ์กราฟิกวิเคราะห์การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กบริเวณโดยรอบของแขนรับไฟที่อยู่ในสถานะ Steady State ดังนั้นงานวิจัยได้จำลองการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กในโครงสร้างแขนรับไฟแบบแขนเดียวได้วิเคราะห์การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กของแขนรับไฟที่มีหน้าสัมผัสเป็นวัสดุแกรไฟต์ และหน้าสัมผัสเป็นวัสดุทองเหลือง ซึ่งค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวภายใต้สายส่งตัวนำบริเวณกึ่งกลางของสายจะส่งผลกระทบต่อแขนรับไฟมากที่สุด คือ 5.9840 ไมโครเทสลา, 5.7515 ไมโครเทสลา ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยทั้งแขนรับไฟอยู่ที่ 0.0559 ไมโครเทสลา, 0.0501 ไมโครเทสลา ตามลำดับ สังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กของหน้าสัมผัสที่ทำมาจากวัสดุแกรไฟต์มีการกระจายตัวเฉลี่ยสูงกว่าหน้าสัมผัสที่ทำมาจากวัสดุทองเหลืองแต่ยังมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นวัสดุแกรไฟต์และทองเหลืองมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาทดแทนในการทำหน้าสัมผัสของแขนรับไฟได้

คำสำคัญ: ไฟไนต์อีลิเมนต์, แขนรับไฟ, สนามแม่เหล็ก

Abstract

The research presents a mathematical model of the magnetic field generated by a single upper-arm pantograph in a 25 kV overhead power transmission system for railways, expressed through second-order partial differential equations. Computer simulation results were obtained using the 3D finite element method implemented in the MATLAB program, providing graphical analyses of the magnetic field distribution around the pantograph in a steady state. The study simulated the magnetic field distribution in a single-arm upper pantograph structure and analyzed the magnetic field distribution of a pantograph with a graphite contact strip and brass as the contact strip material. The magnetic field values under the transmission line, particularly at the center, have the most significant impact on the pantograph, measuring 5.9840 μT and 5.7515 μT , respectively. The overall pantograph averages 0.0559 μT and 0.0501 μT ,

respectively. It is observed that the average and maximum values of the magnetic field for graphite contact strips have a higher average distribution than brass contact strips but remain similar. Therefore, graphite and brass materials exhibit properties suitable for substituting pantograph contact strips.

Keywords: finite element method, pantograph, magnetic field

บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมาการพัฒนาาระบบขนส่งทางรางของประเทศ ได้ใช้วิธีการซื้อเทคโนโลยีและจ้างผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด โดยขาดกระบวนการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากต่างประเทศสู่ผู้เกี่ยวข้องในประเทศอย่างเพียงพอ จึงส่งผลให้ประเทศไทยต้องพึ่งพาเทคโนโลยีและบุคลากรผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศอย่างต่อเนื่อง [1] ตั้งแต่กระบวนการคิดวางแผน การเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมตลอดจนการออกแบบ การก่อสร้าง การบริหาร และการบำรุงรักษาระบบการเดินรถ เนื่องจากขาดแคลนบุคลากรที่มีพื้นฐานความรู้และทักษะในด้านระบบขนส่งทางรางเพียงพอที่จะดูดซับเทคโนโลยีจากบริษัทต่างประเทศ และบ่มเพาะความรู้เทคโนโลยีเหล่านั้นได้อีกทั้งการพัฒนาโครงข่ายด้านระบบขนส่งทางรางที่จะเกิดขึ้นในอนาคตยังไม่มีแผนงานเพื่อเตรียมการสร้างกำลังคนด้านปฏิบัติการมารองรับ

ในปัจจุบันระบบการส่งจ่ายแบบเหนือศีรษะ (overhead catenary) เป็นระบบการจ่ายไฟฟ้าที่มีแขนรับไฟ (pantograph) ทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านกำลังงานไฟฟ้าจากสายตัวนำสัมผัสผ่านตัวสัมผัสเคลื่อนที่ (sliding contact) ที่ทำจากแกรไฟต์ (graphite) จากนั้นไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่ขบวนรถไฟ และจะไหลครบวงจรผ่านรางวิ่ง [2] โดยแขนรับไฟถือได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการรับพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ขบวนรถไฟเป็นอย่างมากเพราะเป็นจุดที่รถไฟพาทิศกับระบบจ่ายไฟมาสัมผัสกัน [3] จากที่กล่าวไปข้างต้นว่าแขนรับไฟมีความสำคัญต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแบบเหนือศีรษะเป็นอย่างมาก แต่บริเวณ

หน้าแถบสัมผัสเกิดความสึกกร่อนจากการเสียดทาน [4] เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้มีจำลองผลการกระจายตัวสนามแม่เหล็กของแขนรับไฟแบบเดียวของรถไฟที่หน้าแถบสัมผัสเป็นวัสดุทองเหลืองในรูปแบบ 3 มิติ [5-6] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้วิเคราะห์ผลการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณแขนรับไฟแบบเดียวของรถไฟ รวมถึงวิเคราะห์สนามแม่เหล็กบริเวณหน้าแถบสัมผัสที่ทำมาจากวัสดุทองเหลืองเปรียบเทียบกับหน้าแถบสัมผัสที่ใช้ในปัจจุบันจากวัสดุแกรไฟต์ โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งแสดงในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อให้ผลลัพธ์กราฟิกวิเคราะห์การแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กบริเวณโดยรอบของแขนรับไฟที่อยู่ในสถานะ steady state มาใช้ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของแขนรับไฟสำหรับรถไฟ

วิธีดำเนินงาน

1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนรับไฟ

สำหรับปัญหาค่าสนามแม่เหล็กใน 3 มิติในระบบพิกัดฉาก ระบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์นิยมจัดรูปสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ แบบจำลองของสนามแม่เหล็กของแขนรับไฟในรูปแบบ 3 มิติ [7] สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (1)

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial z^2}\right) - \mu\epsilon\left(\frac{\partial^2 A}{\partial t^2}\right) - \mu\sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t}\right) + J_0 = 0 \quad (1)$$

โดยที่ A แทน ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก, t แทน เวลา (time), μ แทน สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก (permeability), ε แทน สภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity), σ แทน สภาพนำทางไฟฟ้า (conductivity) ω แทน ความถี่เชิงมุม (angular frequency) และ J_0 แทน ความหนาแน่นของ กระแสภายนอก จากคุณสมบัติของระบบที่เป็น Time-Harmonic อย่างเช่นในระบบสายส่งไฟฟ้า [7-8] จะได้

$$\frac{\partial A}{\partial t} \approx j\omega A \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial^2 t} \approx -\omega^2 A \quad (3)$$

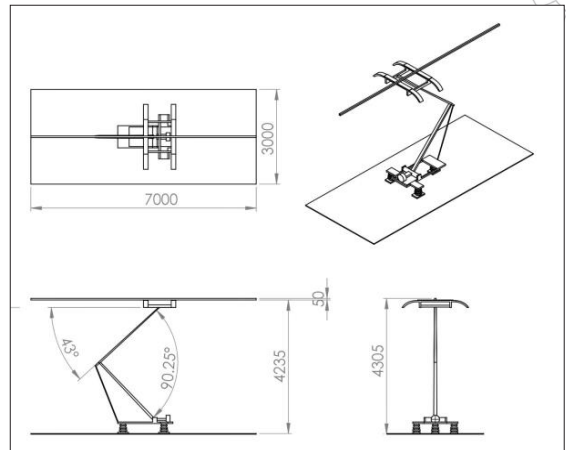
ดังนั้น จากสมการที่ (4) เมื่อพิจารณาปัญหาเป็น แบบ 3 มิติจึงได้

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial z^2}\right) - (j\mu\sigma\omega - \mu\varepsilon\omega^2)A + J_0 = 0 \quad (4)$$

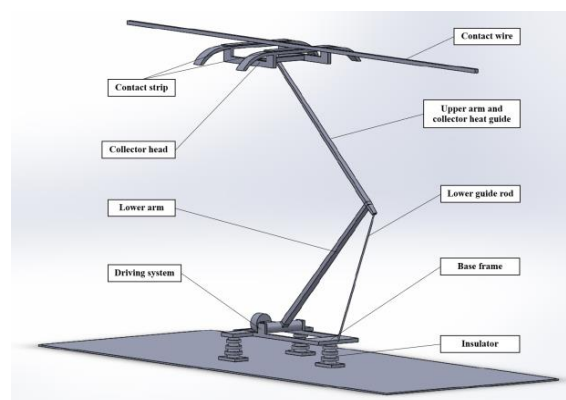
2. การสร้างสมการไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับ ปัญหาใน 3 มิติ

2.1 การแบ่งพื้นที่ศึกษาของแหวนรับไฟ

การแบ่งพื้นที่ย่อยของปัญหาออกเป็นลิเมนต์ ซึ่ง ในที่นี้จะใช้อีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนดหรือจุดเชื่อมต่อ น้อยที่สุด โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์ โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใดๆบนอีลิเมนต์เป็นแบบ เชิงเส้น [8-9] ซึ่งงานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ ย่อย โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป SOLIDWORKS ซึ่ง ประกอบด้วย 266,164 อีลิเมนต์ 45,693 จุดต่อ สำหรับแหวนรับไฟ ได้ผลลัพธ์ออกมาดังรูปที่ 1(ค)



ก) ขนาดของโครงสร้างของแหวนรับไฟ



ข) ชิ้นส่วนภายในแหวนรับไฟ



ค) การแบ่งอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าและการเชื่อมต่อ ระหว่างอีลิเมนต์ภายในโครงสร้างแหวนรับไฟ

รูปที่ 1 การออกแบบและการแบ่งอีลิเมนต์กับจุดต่อ ของแหวนรับไฟแบบ 3 มิติของโปรแกรม

SOLIDWORKS

2.2 การสร้างสมการไฟไนท์อิลิเมนต์

รูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ (element interpolation function) โดยเมื่อสมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น [10-11] จึงได้สมการที่ (5)

$$A(x, y, z) = A_1 N_1 + A_2 N_2 + A_3 N_3 + A_4 N_4 \quad (5)$$

โดยที่ $N_i, i=1,2,3,4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ $A_i, i=1,2,3,4$ คือผลลัพธ์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (1,2,3,4) ของอิลิเมนต์ [10,11] แสดงดังสมการที่ (6)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (6)$$

การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์เพื่อหา ระบบสมการเชิงเส้น โดยอาศัยการประยุกต์วิธีการ ถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาเลอร์คิน (galerkin) โดยมีหลักการดังนี้คือการแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4) จะไม่ก่อให้เกิดค่าเท่ากับศูนย์ [12-13] หากแต่จะมีค่าเท่ากับ R แทนดังแสดงด้วยสมการที่ (7)

$$\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right) - (j\mu\sigma\omega - \mu\epsilon\omega^2) A + J_0 = R \quad (7)$$

ซึ่ง R เรียกว่า เศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าเที่ยงตรงมากที่สุดและในงานวิจัยนี้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาเลอร์คิน [12-13] ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function : W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอิลิเมนต์ (V) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ [14] ดังสมการ (8)

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right) \right) dV - \int_V N_n \left((j\mu\sigma\omega - \mu\epsilon\omega^2) A + J_0 \right) dV = 0 \quad (8)$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ 8 ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลิเมนต์ โดยประยุกต์เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) [14-15] เมื่อกำหนดให้ $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ ดังนั้นจึงได้สมการไฟไนท์อิลิเมนต์แสดงดังสมการที่ (9)

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [A]_{4 \times 1} + \int_V [N_n]_{4 \times 1} (j\mu\sigma\omega - \mu\epsilon\omega^2) [N_n]_{1 \times 4} dV [A]_{4 \times 1} = \int_V [N_n]_{4 \times 1} J_0 dV \quad (9)$$

หรือเขียนสมการไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลิเมนต์ที่ประกอบด้วย 3 สมการ [16-17] ดังสมการที่ (10)

$$[M]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} + [K]_{4 \times 4} \{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (10)$$

โดยที่

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{(j\mu\sigma\omega - \mu\epsilon\omega^2)V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 + d_2 d_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 + d_3 d_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 + d_3 d_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_1 + c_4 c_1 + d_4 d_1 & b_4 b_2 + c_4 c_2 + d_4 d_2 & b_4 b_3 + c_4 c_3 + d_4 d_3 & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix}$$

sym

$$\{F\}_{4 \times 1} = \frac{(J_0)V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

นำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อจึงก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ [16-17] ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าปริมาณเวกเตอร์แม่เหล็กของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (11)

$$[K]_{n \times n} \{A\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (11)$$

เมื่อได้ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กดำเนินการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กจากสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ (12)

$$B = \nabla \times A \quad (12)$$

ผลการจำลองและการอภิปรายผล

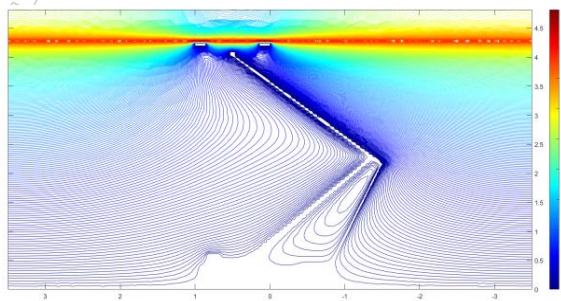
ประยุกต์เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต (initial and boundary condition) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบ (constraints) ซึ่งงานวิจัยนี้มีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่พิจารณาที่แรงดันไฟฟ้า 25 kV, ความถี่ 50 Hz และจำลองผลของสนามแม่เหล็กบริเวณแหวนรับไฟแชนด้านบนแชนเดียวในสถานะ steady state โดยวัสดุหน้าแถบสัมผัสที่นำมาใช้ในการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับแกรไฟต์ซึ่งเป็นวัสดุที่พบหาได้ง่ายในประเทศ คือ ทองเหลือง (brass) ซึ่งพารามิเตอร์ของแต่ละวัสดุแสดงดังตารางที่ 1 [18-20] โดยวัสดุขององค์ประกอบแต่ละส่วนของแหวนรับไฟจะเป็นวัสดุเดิมทั้งหมด และได้เปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของวัสดุเฉพาะบริเวณหน้าแถบสัมผัสของแหวนรับไฟเท่านั้น

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกแสดงด้วยรูปที่ 2 (ก)-(ค) และรูปที่ 3(ก)-(ค) ค่าสนามแม่เหล็กจะมี

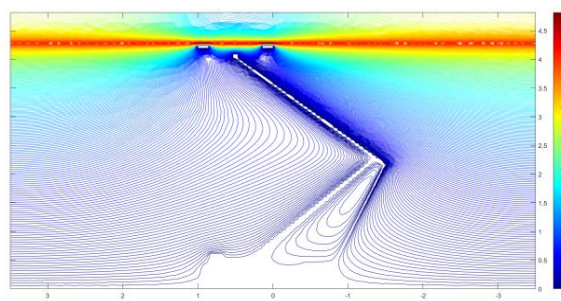
ปริมาณสูงที่ตำแหน่งสายคอนแทกสายสัมผัสกับหน้าสัมผัสของแหวนรับไฟจะเกิดการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมากและส่วนบริเวณรอบนอกถัดจากจุดที่สัมผัสกันนั้นก็จะมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กพบว่ายังมีระยะห่างออกจากบริเวณหน้าสัมผัสยังทำให้บริเวณนั้นมีความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กลดลง โดยจะมีค่าน้อยที่สุดที่ตำแหน่งใกล้กับหลังคาของรถไฟ และเมื่อพิจารณาภาพตัดขวางที่ช่วงความลึกใด ๆ ค่าสนามแม่เหล็กจะกระจายตัวในลักษณะคล้ายคลึงกันทั้งสองวัสดุ เพราะลักษณะของปัญหามีรูปแบบของวัสดุที่แตกต่างกัน และจากผลการจำลองผลทางกราฟิกข้างต้นสามารถสรุปเป็นตารางเพื่อให้เห็นความแตกต่างในเชิงตัวเลขอย่างชัดเจนของการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กดังแสดงด้วยตารางที่ 2 โดยจากข้อมูลในตารางสามารถเสนออยู่ในรูปแบบทางกราฟิกเพื่อแสดงให้เห็นถึงค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กให้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ดังแสดงด้วยรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ และได้เปรียบเทียบค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กในทั้งสองวัสดุออกมาเป็นกราฟดังแสดงรูปที่ 6

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ในการจำลอง

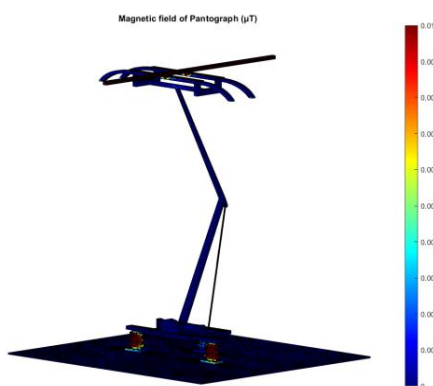
Description	Electrical Conductivity ($\sigma, \frac{S}{m}$)	Relative Permeability (μ_r)	Relative Permittivity (ϵ_r)
เฟรม และฐานเฟรม (steel)	0.8×10^7	3.5	300
ลูกถ้วยฉนวน (silicone)	1×10^{-13}	1	3.1
สายส่ง (copper)	5.8×10^7	0.999991	3.5
หน้าแถบสัมผัส (graphite) (brass)	1×10^3	0.999999	15
	1.59×10^7	1.060	1
อากาศ	0	1.00000036	1.0005



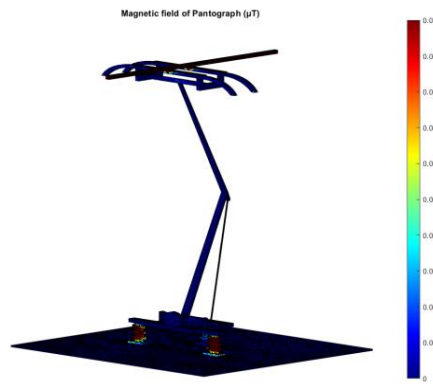
(ก) ภาพตัดขวางการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (μT) ที่ระยะความลึกด้านข้างกึ่งกลางของ แหนบรับไฟ



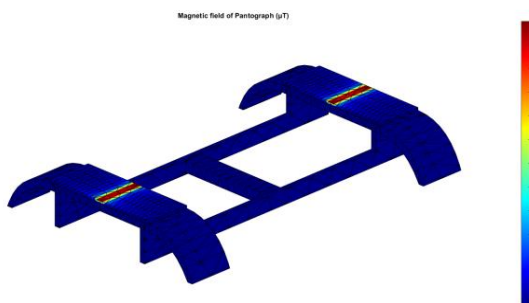
(ก) ภาพตัดขวางการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (μT) ที่ระยะความลึกด้านข้างกึ่งกลางของ แหนบรับไฟ



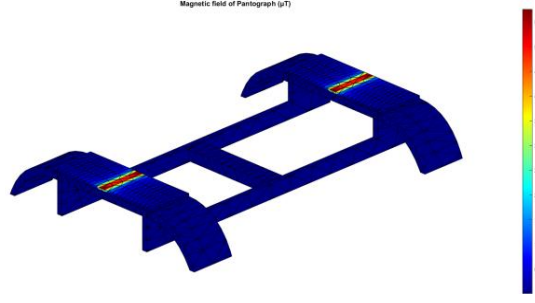
(ข) การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (μT) ของ โครงสร้างแหนบรับไฟ



(ข) การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (μT) ของ โครงสร้างแหนบรับไฟ



(ค) การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (μT) ของแถบ สัมผัสแหนบรับไฟ



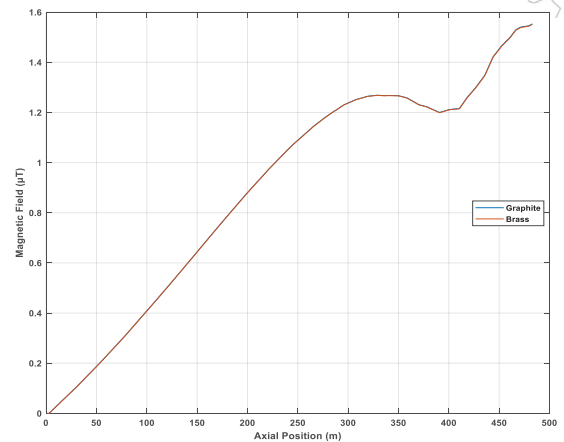
(ค) การกระจายตัวสนามแม่เหล็ก (μT) ของแถบ สัมผัสแหนบรับไฟ

รูปที่ 2 การกระจายตัวสนามแม่เหล็กของแหนบรับไฟ โดยมีวัสดุของแถบหน้าสัมผัสเป็นแกรไฟต์

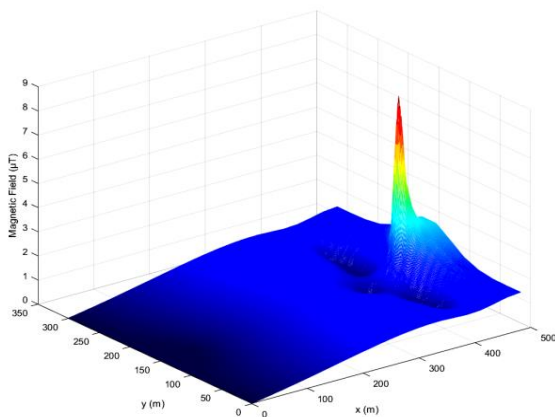
รูปที่ 3 การกระจายตัวสนามแม่เหล็กของแหนบรับไฟ โดยมีวัสดุของแถบหน้าสัมผัสเป็นทองเหลือง

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลเฉลยค่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก (μT) ของวัสดุ 2 ชนิด

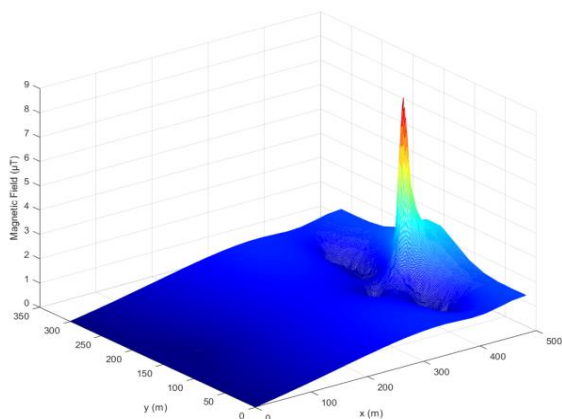
วัสดุของ หน้าแถบ สัมผัส	สนามแม่เหล็ก สูงสุด (μT)		สนามแม่เหล็ก เฉลี่ย (μT)	
	แนวน รับไฟ	หน้า แถบ สัมผัส	แนวน รับไฟ	หน้า แถบ สัมผัส
แกรไฟต์	5.9840	5.9840	0.0559	0.4558
ทองเหลือง	5.7515	5.7515	0.0501	0.4062



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบผลเฉลยค่าสนามแม่เหล็ก (μT) ของวัสดุ 2 ชนิด

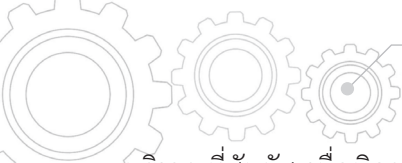


รูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กเพื่อให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดค่าต่ำสุดและสูงสุดโดยมีวัสดุของหน้าแถบสัมผัสเป็นแกรไฟต์



รูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กเพื่อให้เห็นถึงบริเวณที่เกิดค่าต่ำสุดและสูงสุดโดยมีวัสดุของหน้าแถบสัมผัสเป็นทองเหลือง

จากตารางที่ 2 ประกอบกับรูปที่ 4 และ 5 จะสังเกตเห็นว่าค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่ามากที่สุดที่ช่วงตำแหน่งของสายส่งตัวนำที่สัมผัสกับแถบหน้าสัมผัสแนวนรับไฟ และค่าจะลดน้อยลงไปเมื่อห่างสายส่งตัวนำมากขึ้น โดยจะมีค่าน้อยสุดที่ตำแหน่งหลังการรถไฟ โดยเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของแถบหน้าสัมผัสแนวนรับไฟ ซึ่งทำจากแกรไฟต์ที่เป็นวัสดุวิศวกรรมที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง จึงทำให้สนามแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ในแนวนรับไฟ มากกว่าการกระจายตัวของหน้าสัมผัสที่เป็นวัสดุทองเหลือง ทำให้ภายในแนวนรับไฟมีค่าสนามแม่เหล็กเฉลี่ยและสูงสุดต่างกันเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 2 ที่ช่วงความลึกกึ่งกลางของแนวนรับไฟ จะเห็นว่า ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกันของทั้งสองวัสดุที่ทำหน้าสัมผัส โดยจะมีค่าสนามแม่เหล็กของแนวนรับไฟที่แถบหน้าสัมผัสทำมาจากแกรไฟต์ และแถบหน้าสัมผัสทำมาจากทองเหลืองสูงสุดมีค่า $5.9840 \mu T$, $5.7515 \mu T$ ตามลำดับ และค่าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.0559 \mu T$, $0.0501 \mu T$ ตามลำดับ จากรูปที่ 6 ได้แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กซึ่งผลการจำลองของวัสดุทั้ง 2 ชนิด จะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กของหน้าสัมผัสที่ทำมาจากวัสดุแกรไฟต์มีการกระจายตัวเฉลี่ยมากกว่าหน้าสัมผัสที่ทำมาจากวัสดุทองเหลือง และส่งผลไปถึงความร้อนที่เกิดขึ้น



บริเวณที่สัมผัส เมื่อพิจารณาคุณสมบัติอื่นๆของวัสดุ ในส่วนของน้ำหนักวัสดุแกรไฟต์เบากว่าวัสดุทองเหลือง ในส่วนของจุดแตกหักวัสดุทองเหลืองยืดหยุ่นกว่าวัสดุแกรไฟต์ และในส่วนของราคาวัสดุทองเหลืองถูกกว่าวัสดุแกรไฟต์ แต่คุณสมบัติในด้านการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นวัสดุทองเหลืองสามารถนำมาทดแทนในการใช้เป็นแถบหน้าสัมผัสได้

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยได้จำลองค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณแถบรับไฟในระบบสายส่งจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ 25 กิโลโวลต์ เมื่อพิจารณาคุณลักษณะการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแถบรับไฟแบบเดียวในสถานะ steady state โดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ และเปลี่ยนวัสดุในบริเวณหน้าแถบสัมผัสของแถบรับไฟเพื่อเปรียบเทียบค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณโดยรอบของแถบรับไฟโดยการเลือกใช้วัสดุทั้งสำหรับหน้าแถบสัมผัส ได้แก่ แกรไฟต์ และทองเหลือง ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดนี้มีราคาถูกเมื่อพิจารณาแล้วมีคุณสมบัติในด้านการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าใกล้เคียงและสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนกันได้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองหน้าแถบสัมผัสของแถบรับไฟที่ใช้วัสดุแกรไฟต์จะมีค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าวัสดุทองเหลือง ซึ่งปัจจัยสำคัญในการก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้นจะขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า โดยสนามแม่เหล็กจะแปรผันตามระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้งานในระบบส่งจ่ายจ่ายไฟฟ้าเหนือศีรษะ และจะแปรผกผันกับวัสดุที่นำมาทำหน้าแถบสัมผัส สำหรับแถบรับไฟแบบเดียวนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งสนามแม่เหล็กจะแปรผันตามคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่พิจารณา คือสภาพนำทางไฟฟ้าและสภาพขบซึมทางแม่เหล็ก

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric Bonneton, (1994). *Pantograph Project*, University: McGill Research Centre for Intelligent Machines McGill.
- [2] S. Fray, (2012). *Railway Electrification Systems & Engineering*. Delhi: White Word Publications. <http://site.ebrary.com/id/10501851>.
- [3] ธนัตชัย กุลวรรณิชพงษ์, (2018). *Railway Electrification SUT 1st EDITION, (พิมพ์ครั้งที่ 3)*, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [4] J. Wu, (2018). *Pantograph and Contact Line System*, Academic Press, China.
- [5] C. C. Maier, A. Schirrer, M. Kozek, (2018). Real-time capable nonlinear pantograph models using local model networks in state-space configuration, *Mechatronics*, vol.50, no. 11, pp. 292-304.
- [6] A. Schirrer, G. Aschauer, E. Talic, M. Kozek, S. Jakubek, (2017). Catenary emulation for hardware-in-the-loop pantograph testing with a model predictive energy-conserving control algorithm, *Mechatronics*, vol.41, pp. 17-28.
- [7] S. Tupsie, A. Isaramongkolrak, and P. Pao-la-or, (2009). Analysis of Electromagnetic Field Effects Using FEM for Transmission Lines Transposition, *The World Academy of Science Engineering and Technology*, Tokyo, Japan, vol. 3, no. 5, pp. 870-874.



[8] A. Bunmat and P. Pao-la-or, (2015). Analysis of magnetic field effects operators working a power transmission line using 3-D finite element method, *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, Thailand, pp. 1187-1191.

[9] P. Saikham, P. Pao-La-Or, T. Yuangkaew, and A. Bunmat, (2023). Electromagnetic Field Simulation of Pantograph for Electric Train Using 3D Finite Element Method, *2023 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Krabi, Thailand, pp. 68-71.

[10] M. V. K. Chari and S. J. Salon, (2000). *Numerical methods in electromagnetism*, Academic Press, USA.

[11] Jr. W. H. Hayt and J.A. Buck, (2006). *Engineering Electromagnetics* (7th edition), McGraw-Hill, Singapore.

[12] S. Hadi, (1999). *Power System Analysis*, Senior Consulting Edition (3rd ed.), New York: Mc-Graw Hill.

[13] R. Lerch, (1990). Simulation of piezoelectric devices by two and three dimension finite element, *IEEE Transactions on Ultrasonics*, 37 (2): 233-247.

[14] M. Ibrahim and A. Abd-Elhady, (2017), Calculation of Electric Field and Partial Discharge Activity Reduction for Covered Conductor/High Voltage Insulator Systems, *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 72-80.

[15] Y. Fan, H. Li, and S. Yang, (2018). Simulation Study on Electric Field Intensity above Train Roof, *Advances in Materials*,

Machinery, Electronics II AIP Conf. Proc., vol. 1955, pp. 040066-1 – 040066-6.

[16] P. Pao-la-or, and A. Bunmat, (2019). Shielding of Magnetic Field Effects on Operators Working a Power Transmission Lines Using 3-D FEM, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 8, no. 5, pp. 779-785.

[17] International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Phys*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522.

[18] T. Zhao, W. Teng, H. Hao, P. Sun, and Y. Liu, (2019). Simulation Research on Electromagnetic Shielding Characteristics of Carbon Fiber Car Body for Railway Vehicles, *8th International Congress of Information and Communication Technology (ICICT)*, vol. 154, pp. 537–542.

[19] S. D. Pawar, , P. Murugavel, and D. M. Lal (2009). Effect of relative humidity and sea level pressure on electrical conductivity of air over Indian Ocean, *Journal of geophysical research*, vol. 114, D02205.

[20] A. Uygun and J. I. Velasco (2012). Electrical Conductivity Modeling of Polypropylene Composites Filled with Carbon Black and Acetylene Black, *International Scholarly Research Network ISRN Polymer Science*.